

明 細 書

挿入光源

技術分野

- [0001] 本発明は、周期磁場を形成するための第1磁気回路と、この第1磁気回路を支持するための第1支持体と、第1磁気回路に対向配置され、周期磁場を形成するための第2磁気回路と、この第2磁気回路を支持するための第2支持体と、対向配置される第1磁気回路と第2磁気回路の間に形成され、電子ビームが通過するための空間部と、第1磁気回路と第2磁気回路とを真空封止する真空槽とを備えた挿入光源に関するものである。

背景技術

- [0002] 真空中において光速近くまで加速された電子ビームが磁場中で曲げられると、電子ビームの移動軌跡の接線方向に放射光を発光し、これをシンクロトロン放射光と呼んでいる。このシンクロトロン放射光を発生する光源を、電子貯蔵リング(電子ビーム蓄積リング)の直線部に設置し、高指向性、高強度、高偏光性等の特性を生かした種々の技術の実用化のための研究が行われている。今日の電子貯蔵リングには、より高いビーム電流、より小さなビーム断面積、より高いビーム指向性による高輝度光源である挿入光源(アンジュレータ)が多数設けられている。
- [0003] この挿入光源は、例えば、下記特許文献1や非特許文献1, 2に見られるように、電子ビームが通過する周期磁場を形成するために、第1磁気回路と第2磁気回路とを空間部を介して対向配置させた構成を採用している。周期磁場を形成するために、第1・第2磁気回路は多数の永久磁石を並べて構成される。強い磁場を構成しようとする場合は、第1磁気回路と第2磁気回路をできるだけ近づければ、空間部の間隔(いわゆるギャップ)を狭くできるので磁場の強さも大きくなる。そのために、第1磁気回路と第2磁気回路を真空槽で封止する構成を採用している。第1磁気回路と第2磁気回路の間に真空槽を設ける構成に比べると、ギャップを狭くすることができるという利点を有している。
- [0004] しかしながら、上記のような構成でギャップを狭くするにしても、永久磁石の特性上

限界がある。また、ギャップをあまり狭くしすぎると、電子ビームが永久磁石に衝突することによって生じた放射線による永久磁石の減磁という新たな問題が発生する。従って、ギャップを狭くするという方法のみで磁場を強くするには限界があった。

特許文献1:特開2000-206296号公報

非特許文献1:In-vacuum undulators of SPring-8, T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Marechal, S. Okada and H. Kitamura:J. Synchrotron Radiation 5, 403(1998)

非特許文献2:Construction of an in-vacuum undulator for production of undulator x-rays in the 5-25 keV region. S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama and M. Ando; Rev. Sci. Instrum. 61 (1992) 400.

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0005] 本発明は上記実情に鑑みてなされたものであり、その課題は、第1磁気回路と第2磁気回路とを空間部を隔てて対向配置させる場合に、空間部に形成される磁場を強くできると共に耐放射線特性を改善した挿入光源を提供することである。

課題を解決するための手段

- [0006] 上記課題を解決するため本発明に係る挿入光源は、
周期磁場を形成するための第1磁気回路と、
この第1磁気回路を支持するための第1支持体と、
第1磁気回路に対向配置され、周期磁場を形成するための第2磁気回路と、 この第2磁気回路を支持するための第2支持体と、
対向配置される第1磁気回路と第2磁気回路の間に形成され、電子ビームが通過するための空間部と、
第1磁気回路と第2磁気回路とを真空封止する真空槽と、
第1磁気回路と第2磁気回路を構成する永久磁石を室温以下に冷却するための冷却機構とを備えていることを特徴とするものである。
- [0007] この構成による挿入光源の作用・効果を説明する。周期磁場を形成するために、第

第1磁気回路と第2磁気回路とが空間部を挟んで対向配置される。第1磁気回路は第1支持体に支持され、第2磁気回路は第2支持体に支持される。第1磁気回路と第2磁気回路は、共に真空槽内に真空封止される。この周期磁場が形成される空間部に電子ビームを通過させることで、シンクロトロン放射光を発生させることができる。第1磁気回路と第2磁気回路は、夫々永久磁石により構成されるが、この永久磁石を室温以下に冷却させるための冷却機構を備えている。永久磁石を冷却することで、常温で使用する場合よりも、残留磁束密度(Br)や保磁力(iHcで表わし、I-Hカーブ(減磁カーブ)がH軸を横切る点でのHの大きさのことで固有保磁力という)が上がるという特性がある。残留磁束密度が上がることで、磁気特性が高くなり空間部に強力な磁場を形成することができる。また、保磁力が上昇することにより、耐放射線の特性が高くなることが知られている。その結果、第1磁気回路と第2磁気回路とを空間部を隔てて対向配置させる場合に、空間部に形成される磁場を強くできると共に耐放射線特性を改善した挿入光源を提供することができる。

[0008] 従来は、ベーキング処理中は永久磁石が所定温度以上に加熱されないように120℃程度の熱水を、使用時は電子ビームがもたらす熱によって磁気回路温度が不安定にならないよう室温程度の冷却水を循環させて磁気回路を冷却している。

[0009] 本発明の挿入光源として、更に、前記空間部の間隔を変更するための間隔変更機構と、

前記冷却機構に設けられ、冷媒を通過させるための冷媒通過管と、
この冷媒通過管と、第1支持体及び第2支持体とを連結する連結部とを備え、
この連結部が柔軟性を有し、前記間隔変更機構による間隔の変更を許容するように構成されていることが好ましい。

[0010] 間隔変更機構を設けることで、空間部の間隔を変更できるように構成することで、これにより、磁場の強さも調整することができる。また、磁気回路を組み込むときも組立を行い易くできる。冷却機構として、冷媒を通過させるための冷媒通過管を設け、これを第1支持体と第2支持体に連結部により連結する。従って、連結部を介して各支持体に支持される磁気回路を冷却させることができる。また、連結部は柔軟性を有しているため、冷媒通過管を固定させた状態で、空間部の間隔を変更したとして

も(第1・第2支持体を移動させたとしても)、容易に移動させることができる。

[0011] 本発明に係る別の冷却機構は、第1磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第1冷媒通過管と、

第2磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第2冷媒通過管とを備え、

第1冷媒通過管を第1支持体に対して固定支持すると共に、第2冷媒通過管を第2支持体に対して固定支持するように構成されていることが好ましい。

[0012] この場合は、第1冷媒通過管は第1支持体に固定支持され、第2冷媒通過管は第2支持体に固定支持される。これにより、各支持体に支持される磁気回路が冷却される。なお、この構成によれば、第1・第2支持体を移動させる場合に、各支持体に固定した冷媒通過管も共に移動する構成であるから、柔軟性を有する連結部を設けなくても良い。

[0013] 本発明に係る更に別の冷却機構は、第1磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第1冷媒通過管と、

第2磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第2冷媒通過管とを備え、

第1冷媒通過管を第1支持体の内部を貫通するように構成すると共に、第2冷媒通過管を第2支持体の内部を貫通するように構成されていることが好ましい。

[0014] 冷媒を支持体の内部を貫通させるようにすることで、効率良く磁気回路を冷却させることができる。

[0015] 本発明として、空間部の間隔を変更するための間隔変更機構と、

前記冷却機構に設けられ、冷凍機により冷却される冷却ヘッドと、

この冷却ヘッドと、第1支持体及び第2支持体とを連結する連結部とを備え、

この連結部が柔軟性を有し、前記間隔変更機構による間隔の変更を許容するように構成されていることが好ましい。

[0016] 先ほどは冷媒通過管を設けることで冷却機構を構成する例を説明したが、冷凍機を用いた構成も考えられる。この場合、冷凍機の冷却ヘッドを第1支持体及び第2支持体に対して連結部を介して連結させることができる。この場合、連結部は柔軟性を

有しているので、空間部の間隔を変更する場合に、容易に追従させることができる。

[0017] 本発明において、前記第1支持体を支持する第1支持軸と、前記第2支持体を支持する第2支持軸とに夫々中空部を形成していることが好ましい。

[0018] 磁気回路を冷却する冷却機構を設ける場合に、挿入光源の外部からの熱伝導を抑制する必要がある。第1・第2支持体を支持する支持軸は、強度が必要とされるため、金属で形成されるが、金属は熱伝導性がよいので外部からの熱が伝わりやすい。そこで、支持軸を中空に形成することで、熱を伝わりにくくすることができる。よって、磁気回路を所望の冷却温度に設定することができる。

[0019] 本発明において、第1磁気回路の温度を検出する第1温度センサーと、
第1磁気回路を加熱可能な第1ヒーターと、
第2磁気回路の温度を検出する第2温度センサーと、
第2磁気回路を加熱可能な第2ヒーターと、
第1・第2温度センサーによる温度計測データに基づいて、第1ヒーター及び第2ヒーターを制御する温度制御部とを備えていることが好ましい。

[0020] 永久磁石を冷却させる場合、残留磁束密度は温度の低下と共に大きくなっているが、ある温度以上に低下させると逆に残留磁束密度が小さくなるという特性を示す永久磁石も存在する。従って、かかる永久磁石を用いて磁気回路を構成する場合は、冷却温度を制御する必要がある。そこで、各磁気回路を加熱可能なヒーターと、各磁気回路の温度を検出する温度センサーと、各ヒーターを制御する温度制御部を設けることで、適切な冷却温度となるように制御することができる。

[0021] 本発明において、第1支持体及び第2支持体は、夫々、永久磁石を取り付けるホルダー部と、このホルダー部を支持するホルダー支持部とを有し、
このホルダー部の材質をホルダー支持部の材質よりも熱膨張率が大きい等しくなるようにすることが好ましい。

[0022] 永久磁石をホルダー部に対して組み立てる作業は常温で行い、実際に挿入光源を稼働させる場合は、所望の冷却温度に冷却させる。この場合、ホルダー部よりもホルダー支持部の材質の熱膨張率が大きいと、冷却させた場合に熱膨張率の違いに起因して、ホルダー部が変形し磁気回路が破損してしまう。そこで、ホルダー部とホルダ

一支持部とを同一の材質(熱膨張率が等しい)で形成するか、ホルダー部の熱膨張率がホルダー支持部よりも大きくなるようにすれば、熱膨張率の違いによるホルダー部の変形を生じさせなくてすむ。

図面の簡単な説明

- [0023] [図1]第1実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図2]磁気回路の構成を示す図
[図3]磁気回路の別構成を示す図
[図4]温度制御に関する制御ブロックを示す図
[図5]磁石の特性を示すグラフ
[図6]第2実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図7]第3実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図8]第4実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図9]第5実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図10]第6実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図11]第7実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図12]第8実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図13]第9実施形態に係る挿入光源の縦断面図
[図14]永久磁石の具体例を示す図

発明を実施するための最良の形態

- [0024] 本発明に係る挿入光源の好適な実施形態を図面を用いて説明する。図1は、第1実施形態に係る挿入光源の縦断面図を示す図である。図2は、磁気回路の構成を示す概念図である。図3は、磁気回路の別構成を示す概念図である。
- [0025] まず、磁気回路について説明する。図2は、いわゆるハルバッハ型と呼ばれる磁気回路を示している。第1磁気回路11と第2磁気回路12とが空間部13を隔てて配置されている。第1磁気回路11は、4つの永久磁石11a～11dを1組として、これが多数組み電子ビームの進行方向に沿って並べられている。各永久磁石11a～11dの磁化方向は矢印で示されている。第2磁気回路12も、4つの永久磁石12a～12dを1組として、これが多数組み電子ビームの進行方向に沿って並べられている。よって、

磁場の周期は図のように λ で表わされる。この磁石の配列ピッチについては、目的に応じて適宜変更できるものである。

[0026] 空間部13のギャップ間隔は g で表わされる。この間隔 g は、間隔変更機構により変更可能に構成されている。間隔を変更することで、磁場の強さを調整することができる。図2に示すような永久磁石の配置を行うことで、空間部13に周期磁場を形成することができる。この空間部13に電子ビームを通過させると、周期磁場の影響を受けて電子ビームが蛇行しながら進行する。電子ビームの蛇行面 M は、対向している第1・第2磁気回路の磁石の面と平行である。電子ビームを蛇行進行させることで、所望のシンクロトン放射光を発生させることができる。

[0027] 図2に示す磁気回路は永久磁石のみにより構成されているが、図3に示すいわゆるハイブリッド型とよばれる磁気回路では、永久磁石と永久磁石の間に軟磁性体を配置している。すなわち、第1磁気回路は、永久磁石11A、11Cと軟磁性体11B、11Dが交互に配置されており、第2磁気回路は、永久磁石12A、12Cと軟磁性体12B、12Dが交互に配置されている。磁化方向(磁束の方向)については、矢印に示している通りである。本発明に係る挿入光源においては、いずれの磁気回路を採用してもよく、特定の構成を有する磁気回路に限定されるものではない。

[0028] <第1実施形態>

次に第1実施形態に係る挿入光源の構成を説明する。図1は、電子ビームの進行方向に対して垂直な面で切断した場合の縦断面図である。第1磁気回路11と第2磁気回路12とが空間部13を介して対向配置されている。第1磁気回路11は、図2でも説明したように、多数の永久磁石 m が電子ビームの進行方向(図1の紙面に垂直方向)に沿って多数並べて配置されている。第2磁気回路12も同様に永久磁石 m が多数並べて配置されている。なお、好ましい永久磁石 m の具体例については、後述する。

[0029] 第1磁気回路11を取り付け支持するために第1支持体21が設けられ、この第1支持体21は、第1磁石ホルダ21a(ホルダー部に相当)と第1磁石取付部21b(ホルダー支持部に相当)とを備えている。従来は、ベーキング処理により高温にするた

め、第1磁石ホルダ21aは無酸素銅により形成し、第1第1磁石取付ビーム21bはアルミニウムにより形成していたが、本発明においては、いずれも無酸素銅で形成する。後述するように、磁気回路11, 12を冷却させると、磁石ホルダ21aも磁石取付ビーム21bも寸法が縮むが、同じ材料であるから寸法変化に伴う磁石ホルダ21aの変形が生じない。従って、磁気回路11, 12を冷却させたとしても、永久磁石mを変形させて破損させるなどの事故が生じることがない。

[0030] なお、第1磁石ホルダ21aをアルミニウムで形成し、第1磁石取付ビーム21bを無酸素銅で形成しても良い。この場合も、アルミニウムの方が熱膨張率が無酸素銅よりも大きいので、冷却させたとしても、磁気回路11, 12が破損する方向への変形は生じない。

[0031] 第2磁気回路12を取り付け支持するための第2支持体22、第2磁石ホルダ22a、第2磁石取付ビーム22bについても第1磁気回路11と同様である。

[0032] 次に、各磁気回路11, 12を冷却するための冷却機構の構成について説明する。冷却機構として、冷媒を通過させるための冷媒通過管30を設けており、空間部13の左右両側に一对の冷媒通過管30が設けられている。冷媒としては、特定のものに限定されないが、例えば、液体窒素、液体ヘリウム等の液化された冷媒が好ましい。冷媒通過管30も電子ビームの進行方向に沿って配置されている。冷媒は所定の循環経路により循環される構造を採用する。

[0033] 冷媒通過管30と第1・第2支持体21, 22とは連結部31を介して接続されている。連結部31は、柔軟性を有する形状(図示するようにアコーディオン式に折り畳める構造)に形成され、第1・第2支持体21, 22が上下方向に移動したとしても、各支持体21, 22と冷媒通過管30との連結状態を維持できるようにしている。連結部31は、熱伝導性の良い導体(例えば、銅(無酸素銅やベリリウム銅)、アルミニウム)により形成される。なお、冷媒通過管30は、固定された状態である。

[0034] 連結部31に柔軟性を持たせるのは上記の理由であるが、更に、若干の熱抵抗を付与するという目的も有する。熱抵抗を持たせることにより、後述する温度制御を精度よく行うことができる。

[0035] 冷却機構により磁気回路11, 12を冷却する場合、室温以下でかつ液体窒素ある

いは液体ヘリウム以上の温度となるように設定する。なお、設定温度は使用する冷媒の種類や磁気回路11, 12を構成する永久磁石mの種類によって異なるものである。

[0036] 次に、永久磁石mを冷却させることにより生じる効果を説明する。永久磁石の一般的な特性として、冷却により残留磁束密度Brが高くなる。これにより、空間部13において強力な磁場を形成することができる。また、永久磁石を冷却することにより保磁力が高くなる。これにより、耐放射線特性が上昇する。また、永久磁石を冷却させることで、真空槽1内の永久磁石の表面からの気体分子の脱離が減少する。従って、磁気回路11, 12に対してベーキング処理を行わないでも真空槽1内を超高真空にすることができる。ベーキング処理を行うときは所定の温度に加熱しなければならないが、永久磁石を加熱すると熱減磁という問題が発生する。従って、従来のように、ベーキング処理における熱減磁を考慮して、室温で高保磁力かつ低残留磁束密度の材料を選択する必要があった。しかし、本発明の場合、そのような熱減磁を考慮しなくて良いので、常温で低保磁力かつ高残留磁束密度を有する材料を選択することができ、これにより、空間部13に強力な磁場を形成することができる。

[0037] 第1・第2磁気回路11, 12は、真空槽1の中に真空封止されている。真空槽1の中に磁気回路11, 12も封止することで、ギャップ間隔gを小さくすることができる。また、真空封止することで断熱効果を有するので、挿入光源Rが設置される室内の熱が真空槽1を介して磁気回路11, 12に伝達しにくくすることができる。

[0038] 第1・第2磁気回路11, 12を支持した第1・第2支持体21, 22は、不図示の間隔変更機構により上下方向(図1の矢印A, B)に移動させることができる。間隔変更機構としては、例えば、前述した特許文献1あるいは非特許文献1に開示される機構を用いることができる。間隔変更機構により、空間部13のギャップ間隔gを変更することができる。ギャップ間隔gを変更することで、空間部13における磁場の強さが所望になるように調節することができる。

[0039] 第1支持体21の上部は、第1支持軸14により支持されている。第1支持軸14は、金属製であるが、その内部を中空に形成している。第1支持軸14は、そのほとんどが真空槽1の外部にあるため、室内(真空槽外部)の熱が第1支持軸14を伝わって第1磁気回路11の温度を上げる方向に作用する。これを極力抑制するために、第1支持軸

14を中空として熱が伝わりにくくしている。第2支持体22の下部も第2支持軸15により支持されているが、同様の理由で内部を中空に形成している。これにより、支持軸14、15としての強度を確保しつつ、熱伝導性を低下させている。各支持軸14、15の周囲にはベローズ16が設けられており、真空槽1内部の真空性を維持しながらも、各支持軸14、15の上下移動を許容している。

- [0040] 挿入光源は、常温室内に配置されるため、赤外線等による輻射熱を極力避ける必要がある。各磁気回路11、12は、真空槽1により真空断熱をされているが、輻射熱により磁気回路11、12を十分に冷却できないということもありうる。そこで、熱を反射させるための仕組みが必要である。例えば、支持体21、22の磁石ホルダ21a、22aと磁石取付ビーム21b、22bの表面に金メッキ等を施して輻射熱を反射するようにすることが好ましい。
- [0041] 第1支持体21には、第1磁石取付ビーム21bの裏面側に第1ヒーター21cが設けられている。第2支持体22にも同様に第2ヒーター22cが設けられている。また、第1・第2磁石取付ビーム21b、22bの内部に温度センサー21d、22dを埋め込み配置する(図1では不図示)。図4は、温度制御部23の構成を示す制御ブロック図である。温度設定部24には、永久磁石を冷却制御する温度データが設定されている。温度制御部23は、各温度センサー21d、22dからの計測された温度データと、設定されている温度データとを比較して所望の温度になるように、各ヒーター21c、22cを個別に制御する。
- [0042] ヒーターとしては、例えば、シースヒーターを用いることができる。各ヒーター21c、22cの取り付けは、各磁石取付ビーム21b、22bの裏面側に銅板等で押さえつけて、ネジ止めすることで行うことができる。温度センサーとしては、白金を使用した測温抵抗体や熱電対を用いることができる。
- [0043] 温度制御部23は、必ずしも必要ではないが、次のような場合には設けておくことが好ましい。永久磁石の特性として、低温にすればするほど磁気特性が上昇する場合は問題がないが、図5に示すように、ある特定の低温において残留磁束密度がピークを示すような永久磁石材料も存在する。例えば、TSR(スピン再配列温度)以下の温度でスピン再配列を起こすような希土類-鉄-ボロン系磁石である場合、TSR以下

の温度に冷却されないように磁気回路11, 12に対して温度制御を行う必要がある。

[0044] <第2実施形態>

次に、第2実施形態に係る挿入光源を図6により説明する。第1実施形態と同じ機能をする部分については、同じ図番を付することにして説明を省略する。

[0045] 第2実施形態では、第1冷媒通過管30Aと第2冷媒通過管30Bとを備えており、第1冷媒通過管30Aは左右一対設けられ、夫々連結部31Aを介して第1支持体21に対して連結される。また、第2冷媒通過管30Bも同様に連結部31Bを介して第2支持体22に対して連結される。各連結部31A, 31Bは柔軟性を有している。これにより、各冷媒通過管30A, 30Bは真空槽1に対して固定されて取り付けられているが、第1・第2支持体21, 22が上下方向に移動したとしても、各支持体21, 22と冷媒通過管30A, 30Bとの連結状態を維持できるようにしている。

[0046] <第3実施形態>

次に、第3実施形態に係る挿入光源を図7により説明する。第2実施形態と異なるのは、第1・第2冷媒通過管30A, 30Bが固定手段32A, 32Bを介して夫々第1支持体21、第2支持体22に対して固定支持されることである。固定手段32A, 32Bは、金属（例えば、銅板（ベリリウム銅等）、ステンレス板、アルミニウム板）で形成される。第1支持体21や第2支持体22を上下移動させるときは、第1冷媒通過管30Aと第2冷媒通過管30Bもいっしょに上下移動する構成である。従って、柔軟性を有する連結部は用いられていない。なお、固定手段32A, 32Bに熱抵抗を持たせる必要がある場合には、ステンレス板で形成することが好ましい。

[0047] <第4実施形態>

次に、第4実施形態に係る挿入光源を図8により説明する。第3実施形態と異なるのは、第1・第2冷媒通過管30A, 30Bが、直接的に第1支持体21と第2支持体22の側面部に固着されている点である。第3実施形態に示すような固定手段は設けられていない。また、第3実施形態と同様に、第1支持体21や第2支持体22を上下移動させるときは、第1冷媒通過管30Aと第2冷媒通過管30Bもいっしょに上下移動する構成である。従って、柔軟性を有する連結部は用いられていない。各冷媒通過管30A, 30Bを直接的に各支持体21, 22に対して取り付けられているので、効果的に冷却を

行うことができる。また、第4実施形態はヒーターを設けていないが、冷媒の温度を可変とすることで温度制御を行うことができる。次の第5実施形態も同様である。

[0048] <第5実施形態>

次に、第5実施形態に係る挿入光源を図9により説明する。この実施形態では、第1冷媒通過管30Aは、第1支持体21の第1磁石取付ビーム21bの内部に埋め込まれた形で設けられる。第2冷媒通過管30Bも同様に第32磁石取付ビーム22bの内部に埋め込まれている。第1支持体21や第2支持体22を上下移動させるときは、第1冷媒通過管30Aと第2冷媒通過管30Bもいっしょに上下移動する構成である。支持体21, 22の内部に冷媒通過管30A, 30Bを埋め込み配置しているので、効果的に冷却を行うことができる。

[0049] <第6実施形態>

次に、第6実施形態に係る挿入光源を図10により説明する。図10以下の実施形態では、冷凍機33を用いた冷却機構を説明する。図10に示すように、真空槽1の左右両側に一对の冷凍機33を配置し、その冷却ヘッド330を真空槽1の内部に臨ませる。冷却ヘッド330の上端側を第1連結部31Aにより第1支持体21に対して連結する。冷却ヘッド330の下端側を第2連結部31Bにより第2支持体22に対して連結する。冷凍機33は、断熱膨張の原理に基づき各磁気回路11, 12を冷却させることができる。連結部31A, 31Bは、第1実施形態と同様に柔軟性を有している。これにより、第1・第2支持体21, 22が上下方向に移動したとしても、各支持体21, 22と冷却ヘッド330との連結状態を維持できるようにしている。

[0050] <第7実施形態>

次に、第7実施形態に係る挿入光源を図11により説明する。この実施形態では、一对の第1冷凍機33Aと、一对の第2冷凍機33Bとが設けられている。第1冷凍機33Aの第1冷却ヘッド330Aは、第1連結部31Aを介して第1支持体21と連結され、第2冷凍機33Bの第2冷却ヘッド330Bは、第2連結部31Bを介して第2支持体22と連結される。各連結部33A, 33Bは柔軟性を有しており、第1・第2支持体21, 22が上下方向に移動したとしても、各支持体21, 22と冷却ヘッド330との連結状態を維持できるようにしている。

[0051] <第8実施形態>

次に、第8実施形態に係る挿入光源を図12により説明する。図12に示すように第1冷凍機33Aを真空槽1の上方に置き、略L字形に形成された冷却ヘッド330Aの先端を真空槽1の内部に臨ませる。第1支持体21の第1磁石取付ビーム21bの裏面側において、連結部34Aを介して冷却ヘッド330Aと連結させる。第1ヒーター21cは、他の実施形態とは異なり、第1磁石取付ビーム21bの中央凹部に設けている。第2冷凍機33Bは真空槽1の下方に置き、その他の冷却ヘッド330B、連結部34B、第2ヒーター22c等の配置構成は同じである。各連結部34A、34Bは柔軟性を有しており、第1・第2支持体21、22が上下方向に移動したとしても、各支持体21、22と冷却ヘッド330A、330Bとの連結状態を維持できるようにしている。

[0052] <第9実施形態>

次に、第9実施形態に係る挿入光源を図13により説明する。冷凍機33A、33Bの配置は、第8実施形態と同じであるが、冷却ヘッド330A、330Bの先端を直接第1・第2磁石取付ビーム21b、22bに対して固定している。従って、第1・第2支持体21、22が上下方向に移動すると、これといっしょに第1冷凍機33Aと第2冷凍機33Bも上下移動することになる。なお、冷却ヘッド330A、330Bの周囲にはベローズ35が設けられており、真空槽1内部の真空性を維持しながらも、冷却ヘッド330A、330Bの上下移動を許容している。

[0053] 第9実施形態では、冷却ヘッド330A、330Bにヒーターを内蔵させることで温度制御を行うことも可能である。

[0054] <永久磁石の具体例>

本発明に係る挿入光源の磁気回路11、12を構成するのに好適な永久磁石の具体例を図14に示す。図14において、番号1〜5まではNd-Fe-B系の永久磁石であり、スピン再配列を示すため、極低温でBr(残留磁束密度)が減少する。番号6はPr-Fe-B系の永久磁石であり、スピン再配列を示さない。なお、磁場の測定にはホール素子を用いた。RTは室温、LNTは液体窒素温度(77K)、LHeTは液体ヘリウム温度(4.2K)を示している。

[0055] 図3でハイブリッド型を説明したが、このタイプで使用する軟磁性材料については、

パーメンジウム、Ho (ホルミウム)、Dy (ジスプロシウム)、純鉄等を用いることができる。各実施形態における磁気回路は、ハルバッハ型でもハイブリッド型でも良い。

[0056] <効果>

以上のように本発明に係る挿入光源によれば、次のような作用・効果を有する。冷却機構により冷却することで、残留磁束密度 (Br) が上昇し、常温で使用するよりも強力な磁場を空間部に形成することができる。また、冷却することで固有保磁力 (iHc) が上昇し、これに伴い耐放射線性が上昇する。冷却機構により磁気回路、ホルダー部、ホルダー支持部を冷却する構造であるので、超高真空に引く時にベーキングを行う必要がない。よって、ベーキングに伴う熱減磁を考慮する必要がなく、高エネルギー積の永久磁石を使用することができる。

[0057] 従来は、真空槽内において、永久磁石表面からの脱ガスを行って到達真空度を上げるために、ベーキング処理で100℃前後に加熱しても永久磁石が熱減磁しないためには、iHcの高い材質を選択する必要があった。高iHc材料は、相補関係から必然的にBrが低いので、磁気回路により形成される磁束密度が低くなる。

[0058] これに対して、本発明は、永久磁石の冷却によりガス分子が磁石表面にトラップされるので、ベーキング処理による脱ガスを行わなくても、目標の到達真空度を得ることができる。すなわち、磁石を加熱しないので、減磁防止のために高iHc材料を選択しなくても良い。従って、高Br材料を選択することができ、なおかつ、低温でBrが上昇するので、更に高い磁束密度が得られる。

[0059] <別実施形態>

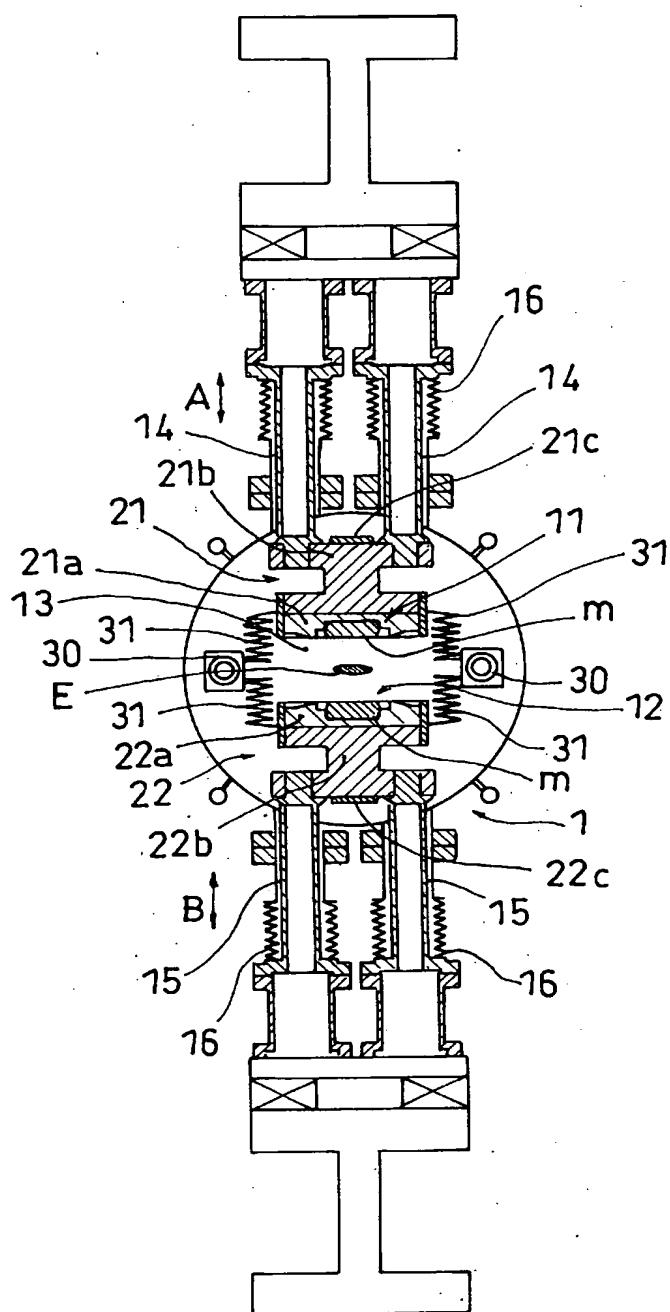
各実施形態において夫々開示された構造は、合理的な範囲内で、任意に組み合わせることができる。

請求の範囲

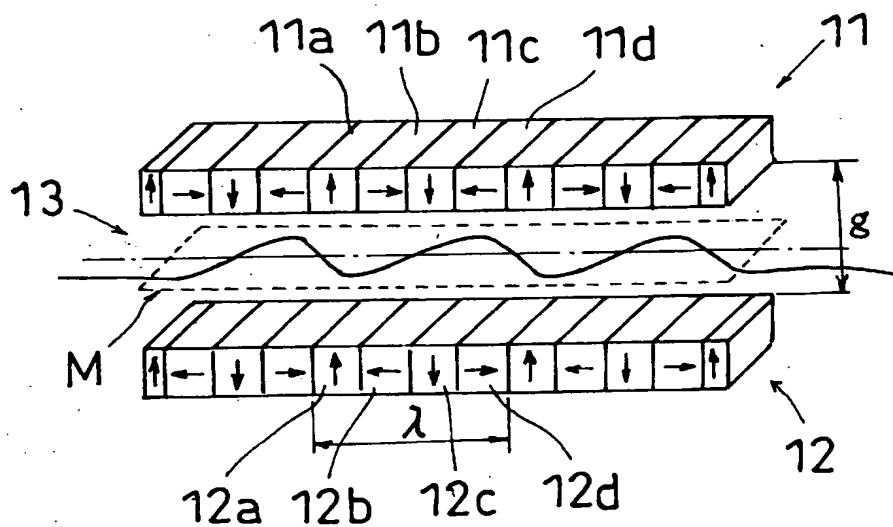
- [1] 周期磁場を形成するための第1磁気回路と、
この第1磁気回路を支持するための第1支持体と、
第1磁気回路に対向配置され、周期磁場を形成するための第2磁気回路と、
この第2磁気回路を支持するための第2支持体と、
対向配置される第1磁気回路と第2磁気回路の間に形成され、電子ビームが通過するための空間部と、
第1磁気回路と第2磁気回路とを真空封止する真空槽と、
第1磁気回路と第2磁気回路を構成する永久磁石を室温以下に冷却するための冷却機構とを備えていることを特徴とする挿入光源。
- [2] 前記空間部の間隔を変更するための間隔変更機構と、
前記冷却機構に設けられ、冷媒を通過させるための冷媒通過管と、
この冷媒通過管と、第1支持体及び第2支持体とを連結する連結部とを備え、
この連結部が柔軟性を有し、前記間隔変更機構による間隔の変更を許容するように構成されている請求項1に記載の挿入光源。
- [3] 前記冷却機構は、第1磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第1冷媒通過管と、
第2磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第2冷媒通過管とを備え、
第1冷媒通過管を第1支持体に対して固定支持すると共に、第2冷媒通過管を第2支持体に対して固定支持するように構成されている請求項1に記載の挿入光源。
- [4] 前記冷却機構は、第1磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第1冷媒通過管と、
第2磁気回路を冷却するために設けられ、冷媒を通過させるための第2冷媒通過管とを備え、
第1冷媒通過管を第1支持体の内部を貫通するように構成すると共に、第2冷媒通過管を第2支持体の内部を貫通するように構成されている請求項1に記載の挿入光源。

- [5] 前記空間部の間隔を変更するための間隔変更機構と、
前記冷却機構に設けられ、冷凍機により冷却される冷却ヘッドと、
この冷却ヘッドと、第1支持体及び第2支持体とを連結する連結部とを備え、
この連結部が柔軟性を有し、前記間隔変更機構による間隔の変更を許容するように構成されている請求項1に記載の挿入光源。
- [6] 前記第1支持体を支持する第1支持軸と、前記第2支持体を支持する第2支持軸と
に夫々中空部を形成している請求項1〜5のいずれか1項に記載の挿入光源。
- [7] 第1磁気回路の温度を検出する第1温度センサーと、
第1磁気回路を加熱可能な第1ヒーターと、
第2磁気回路の温度を検出する第2温度センサーと、
第2磁気回路を加熱可能な第2ヒーターと、
第1・第2温度センサーによる温度計測データに基づいて、第1ヒーター及び第2ヒーターを制御する温度制御部とを備えている請求項1〜6のいずれか1項に記載の挿入光源。
- [8] 第1支持体及び第2支持体は、夫々、永久磁石を取り付けるホルダー部と、このホルダー部を支持するホルダー支持部とを有し、
このホルダー部の材質をホルダー支持部の材質よりも熱膨張率が大いか等しくなるようにしたことを特徴とする請求項1〜7のいずれか1項に記載の挿入光源。

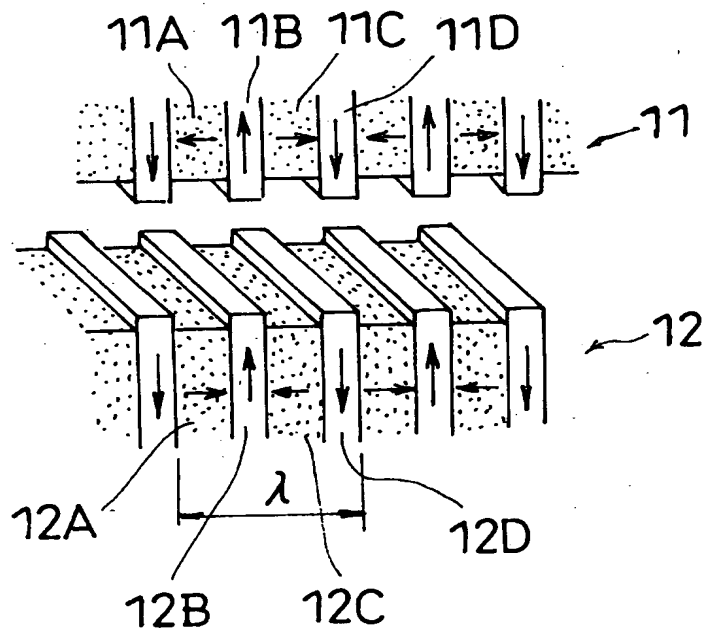
[図1]



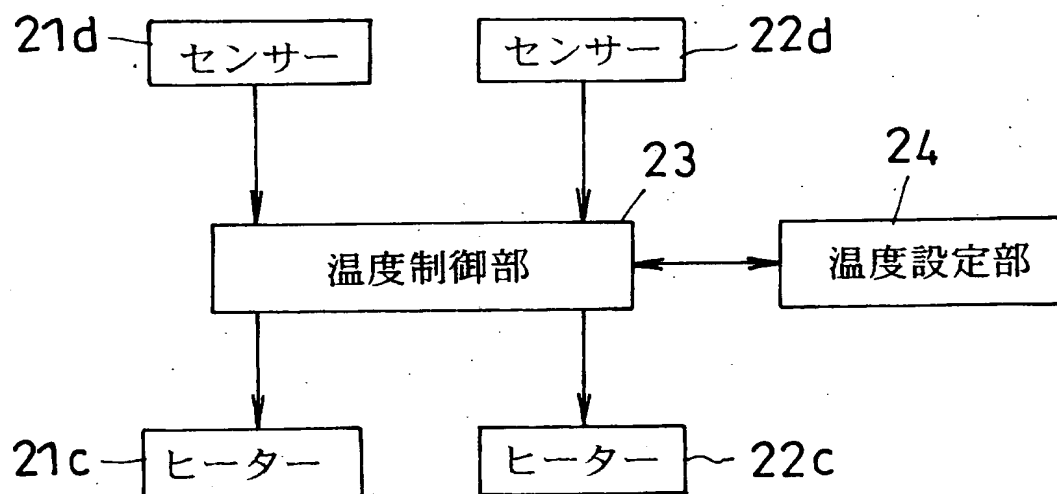
[図2]



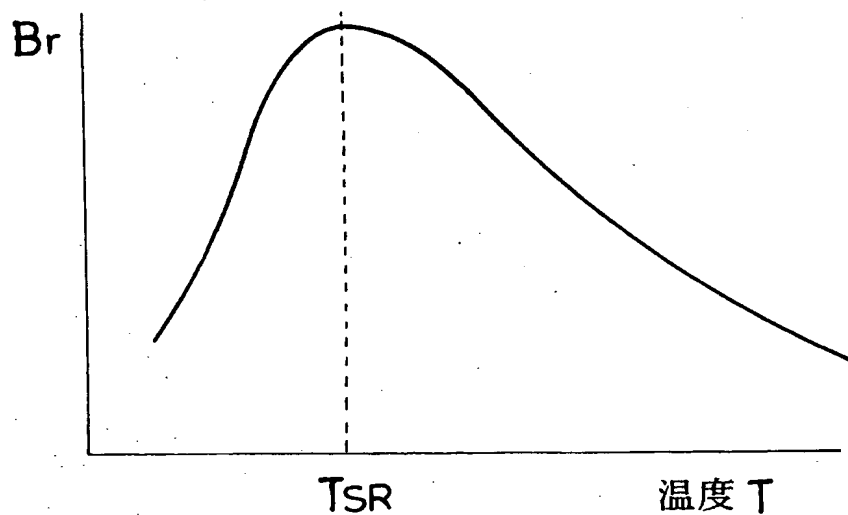
[図3]



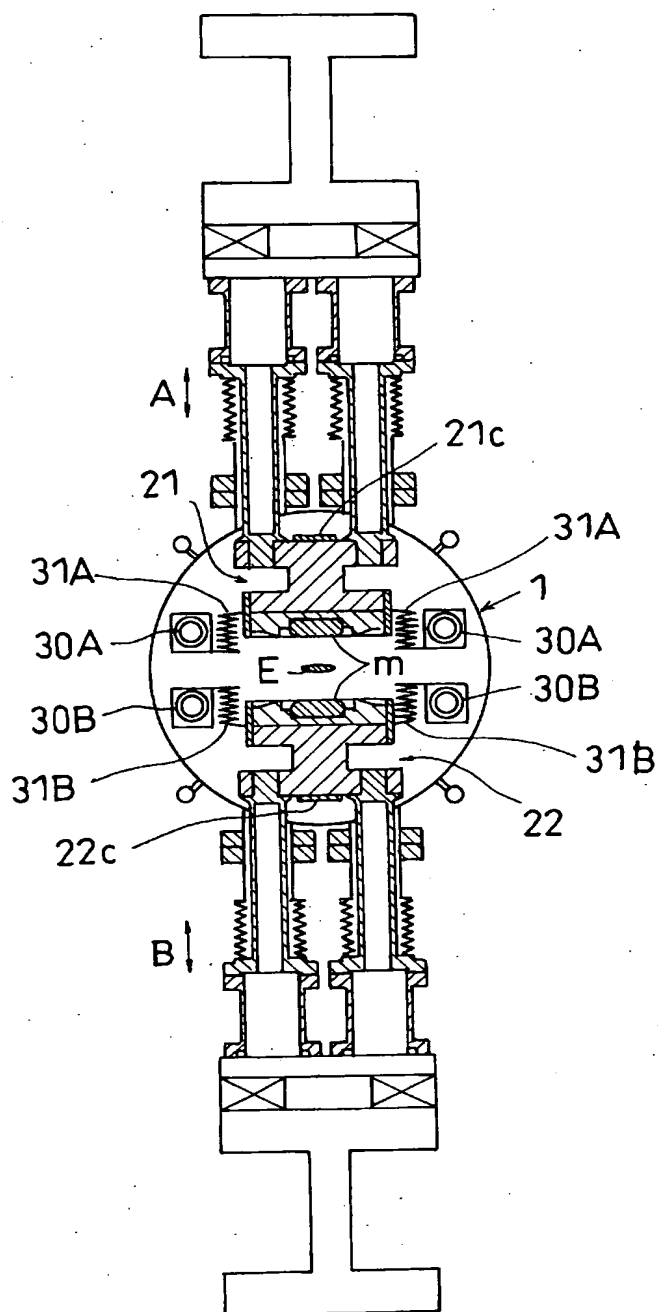
[図4]



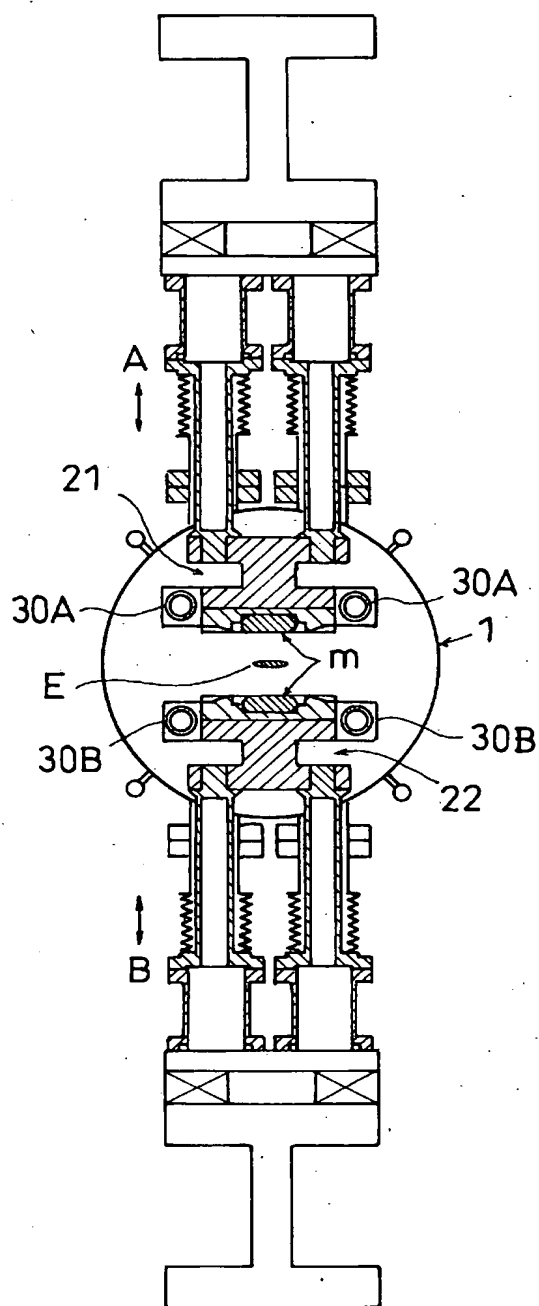
[図5]



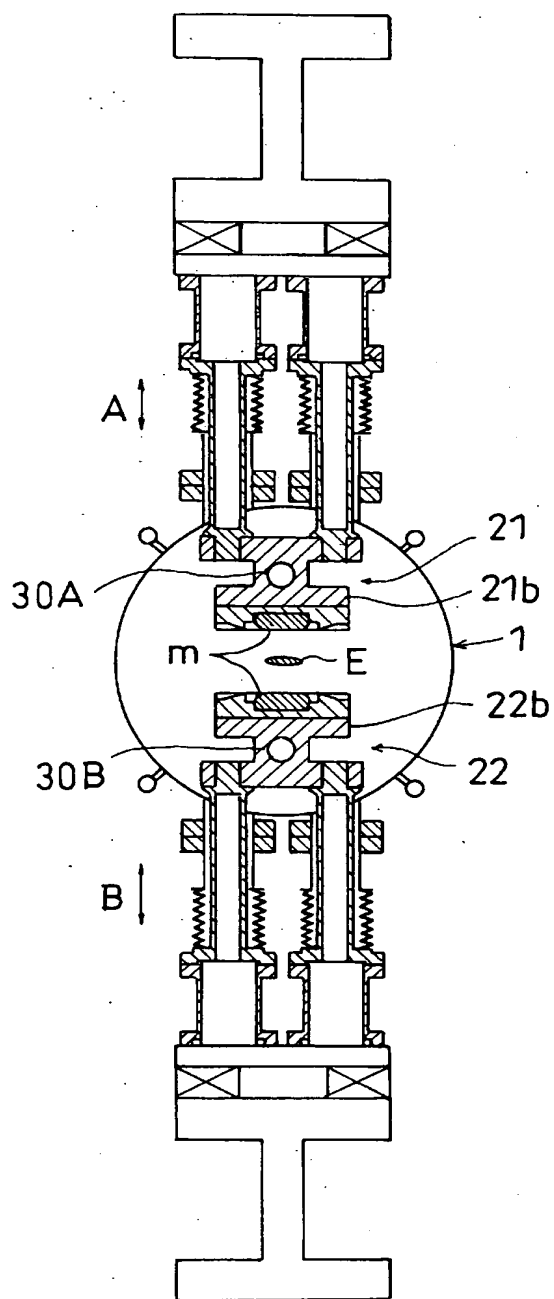
[図6]



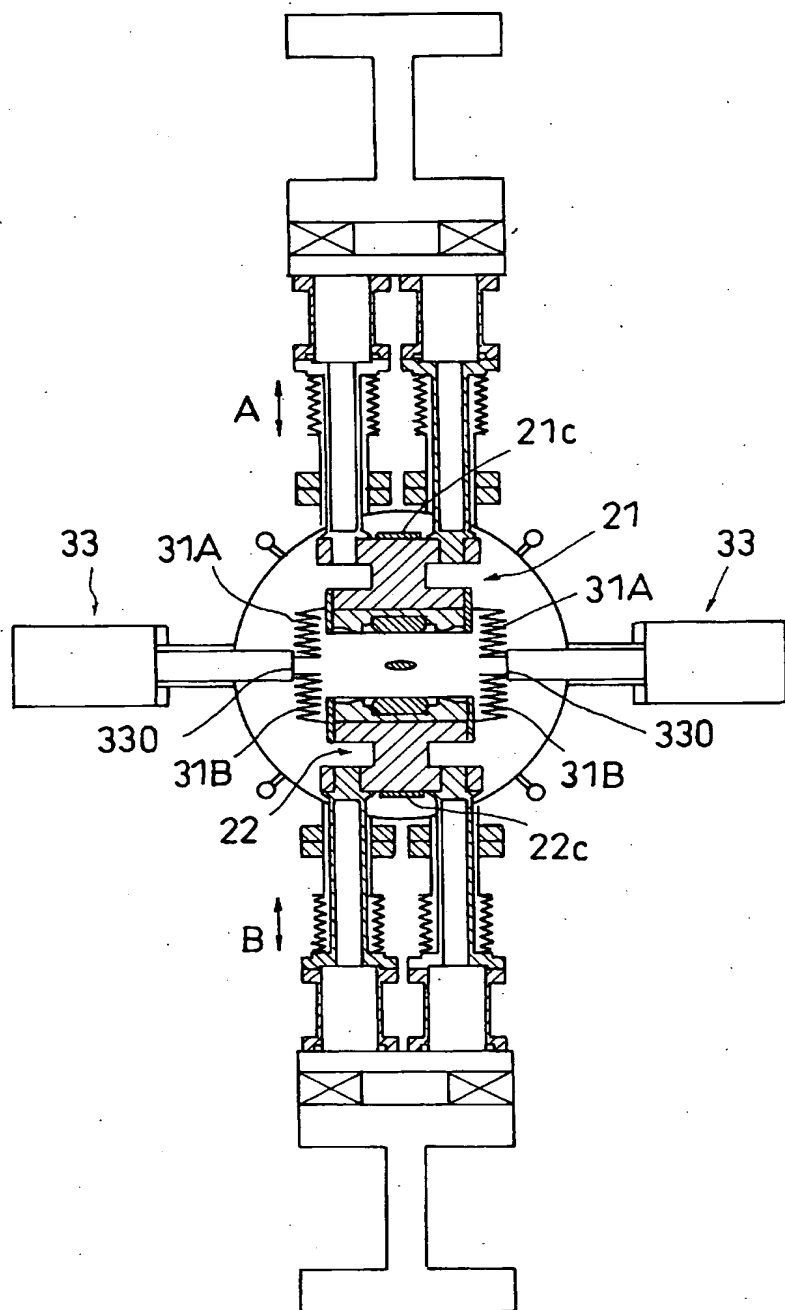
[図8]

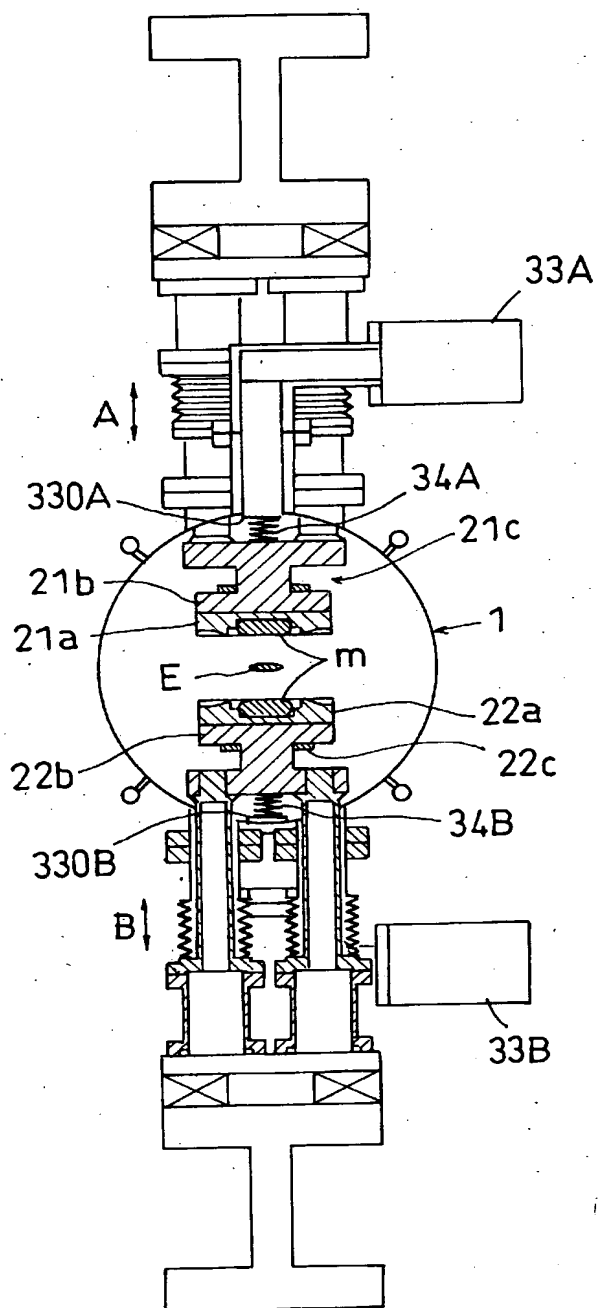


[図9]

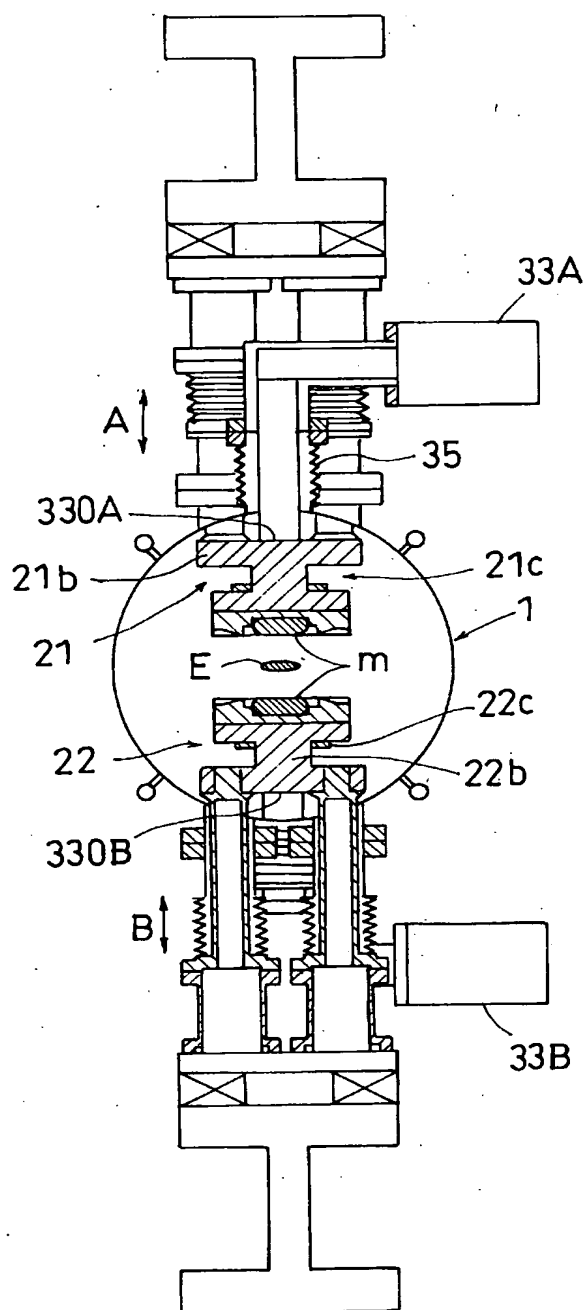


[図10]





[図13]



[図14]

番 号	材質名	公称値			実測値						理論限界
		温度	Br (T)	iHc (MA/m)	RT		低温			Br 比 (低温/RT)	
					Br (T)	iHc (MA/m)	温度	Br (T)	iHc (MA/m)		
1	NEOMAX50BH	RT	1.39-1.45	>1.1	1.44	1.2	150K	1.58	2.9	1.10	1.61 (RT) 1.84 (LNT) 1.85 (LHeT)
2	NEOMAX48H		1.36-1.42	>1.3	1.38	1.3	145K	1.51	3.4	1.10	
3	NEOMAX44H		1.30-1.36	>1.3	1.36		150K	1.48		1.09	
4	NEOMAX35EH		1.17-1.25	>2.0	1.18	2.0	128K	1.28	4.5	1.09	
5	NEOMAX27VH		1.02-1.10	>2.9	1.12	2.5	128K	1.19	4.8	1.07	
6	NEOMAX53CR	RT	1.29	1.2	1.34	1.1	LNT	1.50	>5.6	1.18	1.56 (RT) 1.84 (LHeT)
		LNT	1.50	5.8							
		LHeT	1.57	6.6							

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/000525

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ H05H13/04, G21K1/093, 1/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ H05H13/04, G21K1/093, 1/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2005	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2001-143899 A (The Institute of Physical and Chemical Research), 25 May, 2001 (25.05.01), Claim 12; Par. No. [0021]; all drawings (Family: none)	1
Y	JP 2002-246199 A (Sumitomo Special Metals Co., Ltd.), 30 August, 2002 (30.08.02), Par. No. [0019] (Family: none)	1

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
19 April, 2005 (19.04.05)

Date of mailing of the international search report
10 May, 2005 (10.05.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/000525

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2003-197144 A (Sumitomo Iton Noba Kabushiki Kaisha), 11 July, 2003 (11.07.03), Par. Nos. [0090], [0091] & US 2003-122090 A1	1
Y	JP 7-159543 A (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.), 23 June, 1995 (23.06.95), Full text; all drawings (Family: none)	3, 4, 6-8
Y	JP 2002-75699 A (Sumitomo Special Metals Co., Ltd.), 15 March, 2002 (15.03.02), Par. No. [0031] (Family: none)	3, 4, 6-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H05H13/04, G21K1/093, 1/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H05H13/04, G21K1/093, 1/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2001-143899 A (理化学研究所) 2001. 05. 25 請求項12, 段落0021, 全図 (ファミリーなし)	1
Y	JP 2002-246199 A (住友特殊金属株式会社) 2002. 08. 30 段落0019 (ファミリーなし)	1

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

19. 04. 2005

国際調査報告の発送日

10.05.2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

山口 敦司

2M

9216

電話番号 03-3581-1101 内線 3274

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2003-197144 A (住友イートンノバ株式会社) 2003.07.11 段落0090, 0091 &US 2003-122090 A1	1
Y	JP 7-159543 A (石川島播磨重工業株式会社) 199 5.06.23 全文, 全図 (ファミリーなし)	3, 4, 6- 8
Y	JP 2002-75699 A (住友特殊金属株式会社) 200 2.03.15 段落0031 (ファミリーなし)	3, 4, 6- 8